

Н. Д. Степанов^{*}, Д. Г. Шайсултанов^{}**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород

^{*} *stepanov@bsu.edu.ru*, ^{**} *shaysultanov@bsu.edu.ru*

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cr–Fe–Mn–Ni С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Fe И Cr

Рассмотрено влияние изменения содержания Al от 0 до 14 ат. % на структуру и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы Al–Cr–Fe–Mn–Ni с повышенным содержанием дешевых Fe (34–40 ат. %) и Mn (23–27 ат. %). Показано, что увеличение содержания алюминия приводит к замещению ГЦК фазы сплава без Al ОЦК фазой, содержащей частицы В2 фазы. Сплавы с содержанием Al 10–14 ат. % имеют двухфазную ОЦК/В2 структуру. Рост содержания алюминия также приводит к заметному повышению микротвердости и прочности на сжатие сплавов.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, алюминий, структура, механические свойства.

N. D. Stepanov, D. G. Shaysultanov

EFFECT OF AL CONTENT ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al–Cr–Fe–Mn–Ni HIGH ENTROPY ALLOYS WITH HIGH CONTENT OF FE AND CR

The effect of addition of 0–14 at. % of Al on structure and mechanical properties of the Al–Cr–Fe–Mn–Ni high entropy alloys with high concentration of cheap Fe (34–40 at. %) and Mn (23–27 at. %) was studied. It was revealed that addition of Al results in gradual replacement of FCC phase of the Al-free alloy with BCC phase containing B2 particles. Alloys with 10–14 at. % Al had dual-phase BCC/B2 structure. Increase of Al content resulted in increase of microhardness and compressive strength of the alloys.

Keywords: high entropy alloys, aluminum, structure, mechanical properties.

Высокоэнтропийными сплавами обычно называют сплавы, содержащие от 5 основных компонентов в приблизительно эквиатомных концентрациях (5–35 ат.%) [1]. Концепция высокоэнтропийных сплавов открывает огромные возможности для создания новых сплавов со свойствами, превосходящими свойства «обычных» сплавов. Поэтому

высокоэнтропийные сплавы привлекают внимание исследователей всего мира. На данный момент, экспериментально была показана возможность достижения сочетания высокой прочности и пластичности, рекордной ударной вязкости и вязкости разрушения в сплавах на основе системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni. Однако, большая часть подобных сплавов содержат большое количество дорогостоящих элементов, таких как Co и Ni. Это ограничивает возможности практического применения подобных сплавов. Свойства высокоэнтропийных сплавов, преимущественно состоящих из более дешевых элементов, практически не исследованы. Кроме того, большой интерес представляет легирование сплавов системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni элементами, которые могут вызвать выделение упрочняющих частиц вторых фаз, например, Al, Ti и C. Поэтому в данной работе было выполнено исследование структуры и механических свойств сплавов системы Al–Cr–Fe–Mn–Ni, преимущественно состоящих из Fe и Mn, с различным содержанием Al.

Было проведено исследование сплавов, состоящих из Al (0–14 ат. %), Cr (16–20 ат. %), Fe (34–40 ат. %), Mn (23–27 ат. %), и Ni (13–16 ат. %), в которых рост содержания Al происходит за счет пропорционального снижения содержания остальных элементов. Для получения сплавов был использован метод вакуумной дуговой плавки. Структура и механические свойства сплавов изучались в литом состоянии. Структурные исследования выполнялись с использованием методов рентгеноструктурного анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с локальным энергодисперсионным анализом. Для изучения механических свойств сплавов использовались измерения микротвердости и испытания на сжатие при комнатной температуре.

Исследования показали, что сплав без алюминия состоит из одной фазы с ГЦК решеткой. Сплав имеет крупнозернистую структуру с выраженными дендритными ликвациями. Добавка 2 и 6 ат. % Al приводит к появлению областей ОЦК фазы. Объемная доля областей ОЦК фазы 12 % и 21 % для сплавов с 2 и 6 ат. % Al. ОЦК области обогащены Cr и Fe. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что в ОЦК областях содержится большое количество наноразмерных частиц. Анализ электронограмм показал, что эти частицы имеют упорядоченную B2 структуру. В сплаве с 10 ат. % Al на изображениях, полученных методом сканирующей электронной микроскопии с низким увеличением, наблюдается однофазная структура. Однако, изображения с более высоким разрешением указывают на наличие множества кубических частиц в матрице. Было установлено, что матрица имеет разупорядоченную структуру, а частицы – упорядоченную B2. Частицы B2 фазы преимущественно состоят из Ni и Al. Сплав с 14 ат. % Al обладает похожей на сплав с 10 % Al двухфазной ОЦК/B2 микроструктурой. Однако, частицы B2 фазы в сплаве с большим

содержанием алюминия несколько крупнее и имеют близкую к округлой форму. Было проведено сопоставление полученных экспериментальных данных по фазовому составу сплавов с расчетными равновесными фазовыми диаграммами (программный продукт Thermo-Calc-2017a, база данных TCNEA2). Было выявлено удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчётных результатов.

Механические также сильно зависят от содержания алюминия. Так, микротвердость сплавов возрастает от 130 HV до 420 HV с увеличением содержания Al от 0 до 10 ат. %. С дальнейшим ростом содержанием алюминия, твердость не меняется. Предел текучести, определенный при испытаниях на сжатие, показывает аналогичную зависимость: он возрастает с 240 до 990 МПа при увеличении содержания Al с 0 до 10 ат. % и не меняется с дальнейшим ростом содержания алюминия. При этом, вне зависимости от содержания алюминия, все сплавы показывают хорошую пластичность при испытаниях на сжатие, не разрушаясь после 50 % высотной деформации. При этом стоит отметить высокие прочностные свойства, показанные сплавом с 10 ат. % Al при температурах до 500 °C [2]. Это обуславливает перспективность использования подобных сплавов при повышенных температурах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №16-38-60061).

ЛИТЕРАТУРА

1. Miracle D. B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D. B. Miracle, O. N. Senkov // Acta Mater. 2017. Vol. 122. P. 448–511.
2. Novel Fe₃₆Mn₂₁Cr₁₈Ni₁₅Al₁₀ high entropy alloy with bcc/B2 dual-phase structure / D. G. Shaysultanov [et al.] // J. Alloys Compd. 2017. Vol. 705. P. 756–763.